DOI:10.11931/guihaia.gxzw201801011

山西省植被 NPP 时空变化特征及其驱动力分析

梁爽，张吴平*，毕如田，高培霞，王国芳

（山西农业大学，山西 太谷 030800）

摘要：为了科学有效的管理和调控植被资源，解决水土流失、植被减少等生态问题，缓解生态压力。该文利用山西省 2005~2015 年 MOD17A3H 数据，综合气候、土地利用类型及高程等数据，利用 ARCGIS、ENVI 等软件，运用统计学分析方法，探究揭示了山西省 2005~2015 年植被 NPP 时空分布变化规律及植被 NPP 对气候、人为等影响因素的响应特征。研究发现：2005~2015 年，山西省植被 NPP 年平均值为 326.5 g(C)·m^{-2}·a^{-1}，其中草地、耕地、灌丛和林地的 NPP 多年平均值依次为 300.3 g(C)·m^{-2}·a^{-1}、353.6 g(C)·m^{-2}·a^{-1}、366.5 g(C)·m^{-2}·a^{-1} 和 390.1 g(C)·m^{-2}·a^{-1}；2005~2015 年，山西省植被 NPP 总体波动增大、变化显著，极显著、显著增大区域面积比例达到 56.33%，集中在山西省西部；植被 NPP 极显著、显著减小区域面积集中在山西省东南角，占比为 2.22%；草地 NPP 变化速率最大，耕地大于灌丛，林地最小；山西省植被 NPP 平均值和降水平均值之间表现为呈显著正相关。基于栅格单元值计算，全省 17.01%的区域植被 NPP 与降水之间表现为显著或者极显著正相关，集中在山西省北部；全省 3.66%的区域植被 NPP 与气温之间表现为显著或者极显著负相关，集中在山西省中部。研究结果表明：2005~2015 年，山西省植被 NPP 总体呈好转趋势；不同植被对人类活动及环境变化的响应有所差异，草地、耕地生态结构稳定性较弱，NPP 变化明显，灌丛和林地稳定性较强，NPP 数值稳定；植被 NPP 与降水之间呈显著正相关，与气温之间呈负相关，气候因子整体上促进植被 NPP 增大，人为因素整体上抑制植被 NPP 增大。

关键词：山西省；植被净初级生产力；土地利用类型；MODIS；驱动力

中图分类号：Q948　　文献标识码：A

Variation of vegetation net primary productivity and its driving factors in Shanxi province

LIANG Shuang, ZHNAG Wu-Ping*, BI Ru-Tian, GAO Pei-Xia, Wang Guo-Fang

（*Shanxi Agricultural University*, Taigu, Shanxi, 030800）

Abstract: In order to solve the ecological problems such as soil erosion, vegetation reduction and so on by scientifically and effectively manage of vegetation resources. In this paper, the data of MOD17A3H in Shanxi Province were used to analyze the temporal and spatial distribution of vegetation NPP in Shanxi Province from 2005~2015 by using the software such as ARCGIS and ENVI. The climate, land use types and elevation data also used to analyze the response characteristics of vegetation NPP to climate and other influencing factors by using Statistical method. The study found：The average vegetation NPP of Shanxi province during 2005~2015 was 326.5 g(C)·m^{-2}·a^{-1}. the average NPP of grassland, farmland, shrubs and forestland during 2005~2015 were 300.3 g(C)·m^{-2}·a^{-1}, 353.6 g(C)·m^{-2}·a^{-1}, 366.5 g(C)·m^{-2}·a^{-1} and 390.1 g(C)·m^{-2}·a^{-1}; The overall fluctuation of vegetation NPP in Shanxi Province increased significantly with a significant or significant increase in the proportion of regional area reached 56.33%, mainly concentrated in the western part of Shanxi Province; The significant or significant reduction of vegetation NPP area is mainly concentrated in the southeastern corner of Shanxi Province, accounting for 2.22% of the total area; The rate of change of grassland NPP is the largest, the farmland is greater than the shrub, and the forest land is the smallest; There is a significant positive correlation between the average of vegetation NPP and the average of precipitation in Shanxi Province. Based on calculated pixel value， the area of vegetation NPP and precipitation significantly and extremely significantly positively related to the total area of the study area accounted for 17.01%, mainly concentrated in northern Shanxi Province; The area of vegetation NPP and temperature significantly and extremely significantly negative correlation related to the total area of the study area accounted for 3.66%, mainly concentrated in central Shanxi Province. The results show: the vegetation NPP of Shanxi province

基金项目：国土资源部公益性行业项目“北方村庄压煤山丘区土地综合整治技术研究”（201411007）[Supported by Public welfare industry project of ministry of land and resources“research on comprehensive land reclamation technology in coal mining hill areas in northern China”（201411007）]。

作者简介：梁爽(1993-)，男，安徽省寿县人，硕士研究生，主要从事土地信息技术与遥感研究。E-mail:liangs@126.com。

*通讯作者：张吴平，博士，教授，主要从事资源环境和土地信息技术研究。E-mail：zwping@126.com。

during2005~2015 was improving; The response of different vegetation to human activities and environmental factors is different, the stability of grassland and farmland is weak, and the NPP changes obviously, the stability of shrub and forestland is strong, and NPP is stable; There was a significant positive correlation between vegetation NPP and precipitation, and a negative correlation between vegetation NPP and temperature, as a whole, the climate factor promotes the rise of NPP, while the human factor is mainly manifested as the inhibitory effect on NPP changes.

Keywords: Shanxi Province, net primary productivity vegetation, land use type; MODIS, driving factor

植被净初级生产力（Net primary production，简称 NPP）是指单位面积的植被在单位时间内凭借自身光合作用产生的有机物扣去自养呼吸消耗后余下的部分（Lieth&Whittaker，1975），体现了植被将无机碳固定、转化为有机碳的效率。NPP 是植被自身和其他生物在生态系统中生存、发育及繁衍的物质基础，它是植被自身和外界环境因素之间相互作用、相互影响所产生的结果，是评价生态环境优劣的重要指标之一。因此，为了掌握植被 NPP 的时空分布特征及变化规律、分析各种影响因素与植被 NPP 之间相关性，进而改善生态、推动可持续发展的研究在生态问题日益严峻的今天显得尤为重要。自 Ebermayer 于 1876 年开始研究植被初级净生产力以来，不同国家的专家学者通过大量的实验研究，提出了各种计算和测量植被 NPP 的方法，在模型模拟植被 NPP 方面取得了一定成果。自上世纪 80 年代起，专家们为了弥补植被 NPP 经验模型的缺陷，研究出了基于植被生物特征的植被 NPP 过程模型。随着 3S（地理信息科学、全球定位系统、遥感）技术的高速发展，植被 NPP 过程模型得到了充分的普及与应用（孙力炜，2013）；上世纪 90 年代后期，以孙睿（2001）、朴世龙（2001）、陈利军（2002）为代表的国内学者们在 Landsat、MODIS 等数据大规模进入国内的基础上大力促进了国内关于植被 NPP 的分析研究。现今，随着技术日趋成熟、数据日益完善，植被 NPP 的研究工作日渐成熟，在改善生态环境、推动可持续发展方面发挥着越来越重要的作用。山西省地处中国北部，属温带大陆性季风气候，是典型的黄土高原，境内有吕梁、太行两座山脉，植被类型丰富。山西省矿产资源丰富，近些年来，随着经济发展，人类活动加强，资源开采过度使得土壤污染、植被减少、水土流失等生态问题日益严峻，潜在的资源得不到科学合理的开发利用，经济可持续发展受到严重影响，植被 NPP 作为评价生态系统的重要指标，而对于山西省植被 NPP 状况的研究相对匮乏。因此，该文利用山西省 2005~2015 年 MO17A3H 数据，综合气温、降水等数据，运用统计学分析方法，揭示了山西省植被 NPP 时空分布格局及其变化规律，分析了植被 NPP 在不同环境条件(区域、植被类型、高程)下对气候变化及人类活动的响应特征，为山西省植被保护和合理开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

山西省位于中国北部，总面积 15.67 km^2，是典型的黄土高原地形，山区面积比例达到 80%以上，地势上东北高西南低，境内大部分地区高程超过 1 500 m。山西省属于温带大陆性季风气候，年平均气温最低为 3 ℃，最高为 14 ℃，昼夜温度差异明显，南北温度差异明显。全省冬季日平均气温均在 0 ℃以下，夏季全省气温较高，7 月份日平均气温介于 21~26 ℃之间。全省年总降水量约为 400~650 mm，降雨量不平均，六月份至八月份雨多且集中，降水量达到全年总降水量的 60%，全省地形地貌复杂多变，山区众多，对降雨的影响很大，不同地区降水差异性显著。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

NPP 数据为美国 NASA EOS/MODIS 2005~2015 年的 MOD17A3H 数据，其利用 MODIS 卫星数据结合模型运算出 NPP 数据，具有精度高易操作的优点，空间分辨率达到 500 m，时间分辨率为 1 a。

高程数据来源于中国科学院地理空间数据云（http://www.gscloud.cn），空间分辨率为 30 m。

土地利用类型数据为 2010 年美国 MODIS 的 MCD12Q1 数据，空间分辨率达到 500m。

气象数据来自中国气象科学数据网（http://cdc.cma.gov.cn），采用反距离权重法（IDW）对 2005~2015 年山西省及其周边省（市）30 个气象站点逐年的温度、降水数据进行插值运算。

为了避免因数据之间坐标、分辨率等属性不同而导致的误差，该文利用 ARCGIS 软件将所有数据统一转换为 WGS84/UTM 坐标系、500 m 分辨率后，再由 ARCGIS 和 ENVI 软件进行后续的研究分析。

2.2 研究方法

2.2.1 植被 NPP 变化趋势研究

采用线性回归方法研究 2005~2015 年山西省每个栅格单元内植被 NPP 随时间变化趋势（穆少杰和李建龙等，2013）（朱锋和刘志明等，2010）（吴珊珊和姚治君等，2016）。

$$Slope=\frac{N\times\sum_{i=1}^{N}x_it_i-\sum_{i=1}^{N}x_i\sum_{i=1}^{N}t_i}{N\times\sum_{i=1}^{N}t_i^{\,2}-(\sum_{i=1}^{N}t_i)^2}$$

（1）

变化速率 *Slope* 为正值区域，植被 NPP 随时间变化呈增大趋势，变化速率 *Slope* 为负值区域，植被 NPP 随时间变化呈减小趋势（李晓荣和高会等，2017）。对植被 NPP 变化趋势进行 F 检验以验证其显著性。

$$F=(N-2)\frac{\sum_{i=1}^{N}(\hat{x}_i-\bar{x})^2}{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\hat{x}_i)^2}$$

（2）

将检验结果分为 5 种类型：极显著减小、显著减小、变化不显著、显著增大和极显著增大（李晓荣，高会等，2017）。

2.2.2 植被 NPP 与气候因素之间的相关性研究

利用根据栅格单元值运算得到的偏相关性系数研究植被 NPP 与降水、气温之间的相关性（穆少杰和李建龙等，2013）。偏相关性系数由简单相关性系数运算得到。简单以及偏相关性系数算法如算式（3）和算式（4）所示：

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(y_i-\bar{y})^2}}$$

（3）

$$r_{ab,c}=\frac{r_{ab}-r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1-r^2{}_{ac})+(1-r^2{}_{bc})}}$$

（4）

对偏相关性系数计算结果进行 t 检验，检验公示如下：

$$t=\sqrt{N\text{-}2}\,\frac{r}{\sqrt{1-r^2}}$$

（5）

将检验结果分为极显著负相关、显著负相关、相关性不显著、显著正相关和极显著正相关 5 种类型（李晓荣和高会等，2017）。

2.2.3 植被 NPP 分区统计研究

基于高程数据将研究区域划分成不同梯度区域，结合土地利用类型数据和植被 NPP 年平均值数据，对研究区域植被 NPP 分类研究，分析高程梯度上植被 NPP 分布变化特征及人为、气候等因素与植被 NPP 之间的相关性。

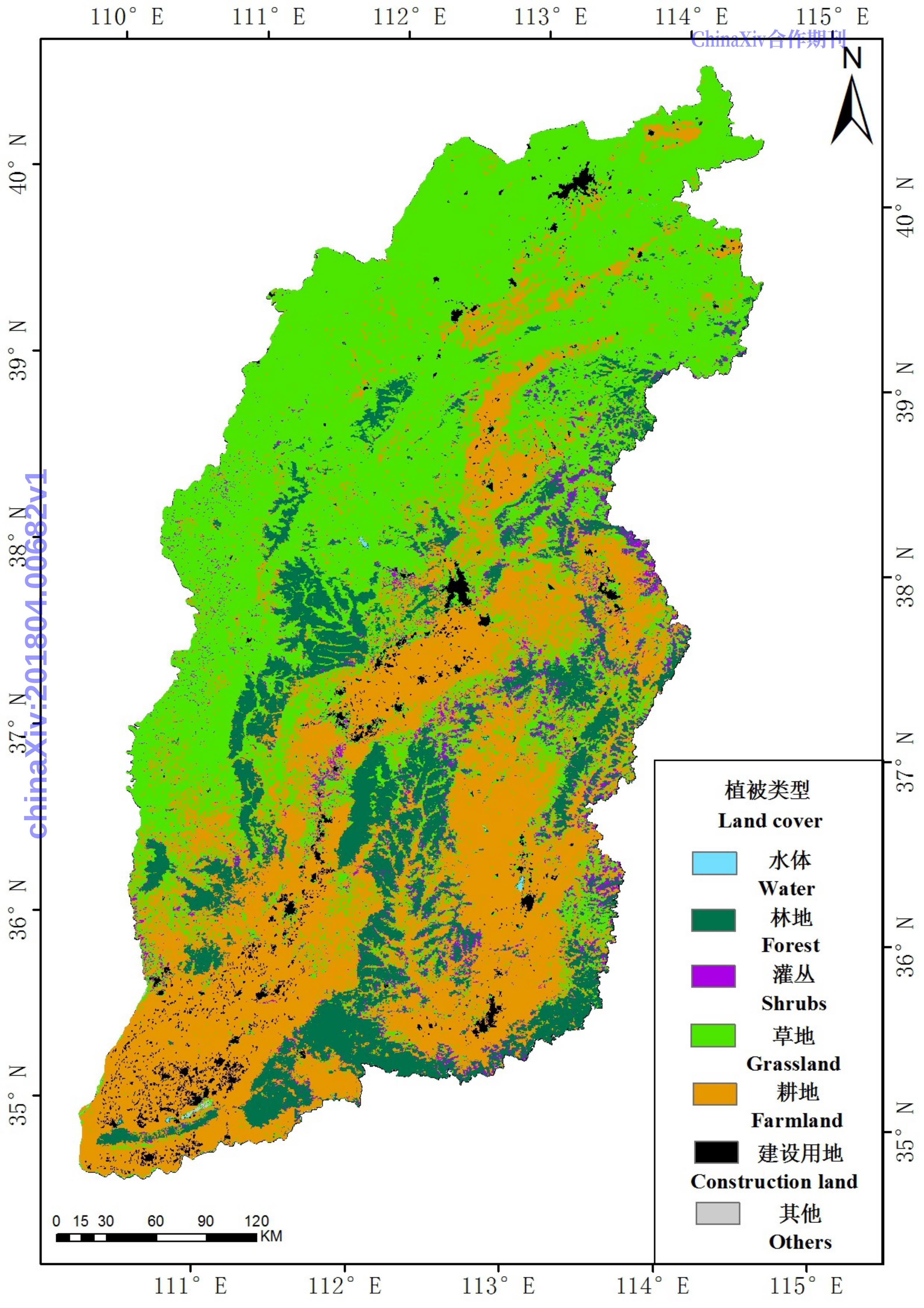
3 结果与分析

3.1 NPP 空间分布特征

利用山西省 MOD17A3H 数据，根据土地利用类型数据进行分类研究，研究发现：山西省植被

NPP2005~2015 年间平均值为 326.5 g(C)·m^{-2}·a^{-1}，其中 93.53%的区域植被 NPP 值在 200~500 g(C)·m^{-2}·a^{-1} 之间，草地 NPP 平均值为 300.3 g(C)·m^{-2}·a^{-1}，耕地 NPP 平均值为 353.6 g(C)·m^{-2}·a^{-1}，灌丛 NPP 平均值为 366.5 g(C)·m^{-2}·a^{-1}，林地 NPP 平均值为 390.1 g(C)·m^{-2}·a^{-1}。

根据 2005~2015 年山西省植被 NPP 平均值空间分布图（图 1）可以看出：山西省植被 NPP 空间分布整体上呈现北低南高，西低东高的特征。结合自然条件、地形地貌及人为活动等因素分析可知：山西省水热等自然条件自北向南、自西向东逐渐变好，境内吕梁、太行两座山脉主要分布在东部和南部，山区植被覆盖度高，受人为因素影响较小，植被 NPP 数值高；山西省煤炭资源丰富，境内矿区众多，而西部和北部矿区多为露天矿区，其开采方式会对植被造成一定程度的破坏，植被覆盖度较低，所以植被 NPP 值较低。因此山西省植被 NPP 总体上呈现北低南高，西低东高的分布特征。



110° E
111° E
112° E
113° E
114° E
115° E
40° N
39° N
38° N
37° N
36° N
35° N
N
植被类型
Land cover
水体
Water
林地
Forest
灌丛
Shrubs
草地
Grassland
耕地
Farmland
建设用地
Construction land
其他
Others
0 15 30 60 90 120
KM

图 1 山西省 2005~2015 年植被 NPP 平均值空间分布图　　　　图 2 山西省土地利用类型图

Fig.1 Spatial distribution of average annual vegetation NPP of Shanxi Province form 2005~2015　Fig.2 The vegetation cover type of Shanxi province

3.2 植被 NPP 年际变化分析

根据山西省 2005~2015 年植被 NPP 年平均值变化趋势图（图 3）可以看出：2005~2015 年，山西省植被 NPP 总体波动增加，不同类型植被 NPP 的年际变化趋势和山西省植被 NPP 总体变化趋势大体相同，表明是某种大范围影响因素影响了山西省植被 NPP 总体变化趋势。

由山西省 2005~2015 年植被 NPP 变化速率空间分布图（图 4）可以看出：2005~2015 年，山西省 86.07%的区域植被 NPP 年际变化率介于 0~15 g(C)·m^{-2}·a^{-1}之间，87.73%的区域植被 NPP 年际变化率为正值，表明山西植被 NPP 总体呈增大趋势。山西省中西部地区植被 NPP 增长较快，植被 NPP 减小区域则集中分布在东南部。根据植被 NPP 变化趋势的显著性检验结果图（图 5）能够看出，植被 NPP 整体显著改变，植被 NPP 显著增大及极显著增大区域面积占总面积的 56.33%，主要集中在山西省西部；植被 NPP 显著减小以及极显著减小区域主要集中在山西省东南角。草地 NPP 显著或者极显著增大区域面积占草地区域总面积比例最大，达到了 69.20%，远高于其他类型植被；林地 NPP 显著或者极显著减小区域面积占林地区域总面积比例最大，达到了 7.56%。总体上林地和灌丛生态系统结构稳定，对环境变化响应不显著，而以草本科植物为主要成员构成的草地、耕地生态系统结构相对简单，受环境变化影响显著，当环境变好之后 NPP 会显著增大。

结合山西省 2005~2015 年植被 NPP 变化速率空间分布图（图 4）及植被 NPP 变化显著性检验结果图（图 5）可以看出：植被 NPP 快速增大的区域，其植被 NPP 多表现为显著或者极显著增大，表明研究期间该区域植被状况明显好转；植被 NPP 减小的区域，其植被 NPP 多表现为不显著，表明研究期间植被 NPP 减小区域的植被没有明显恶化。植被 NPP 显著或者极显著增大区域以草地与耕地居多，而显著或者极显著降低区域则以林地居多，NPP 减小区域大部分分布在太行山内，并且该区域内植被 NPP 较低且植被 NPP 变化速率也较小，表明该区域长期受到负面因素影响。植被 NPP 显著减小区域面积小、分布零散，而气候因素影响广泛，表明气候因素不是造成此部分植被变差的主要原因，结合太行山近些年开发历史分析，推测人为因素是部分植被 NPP 显著减小的重要原因之一。

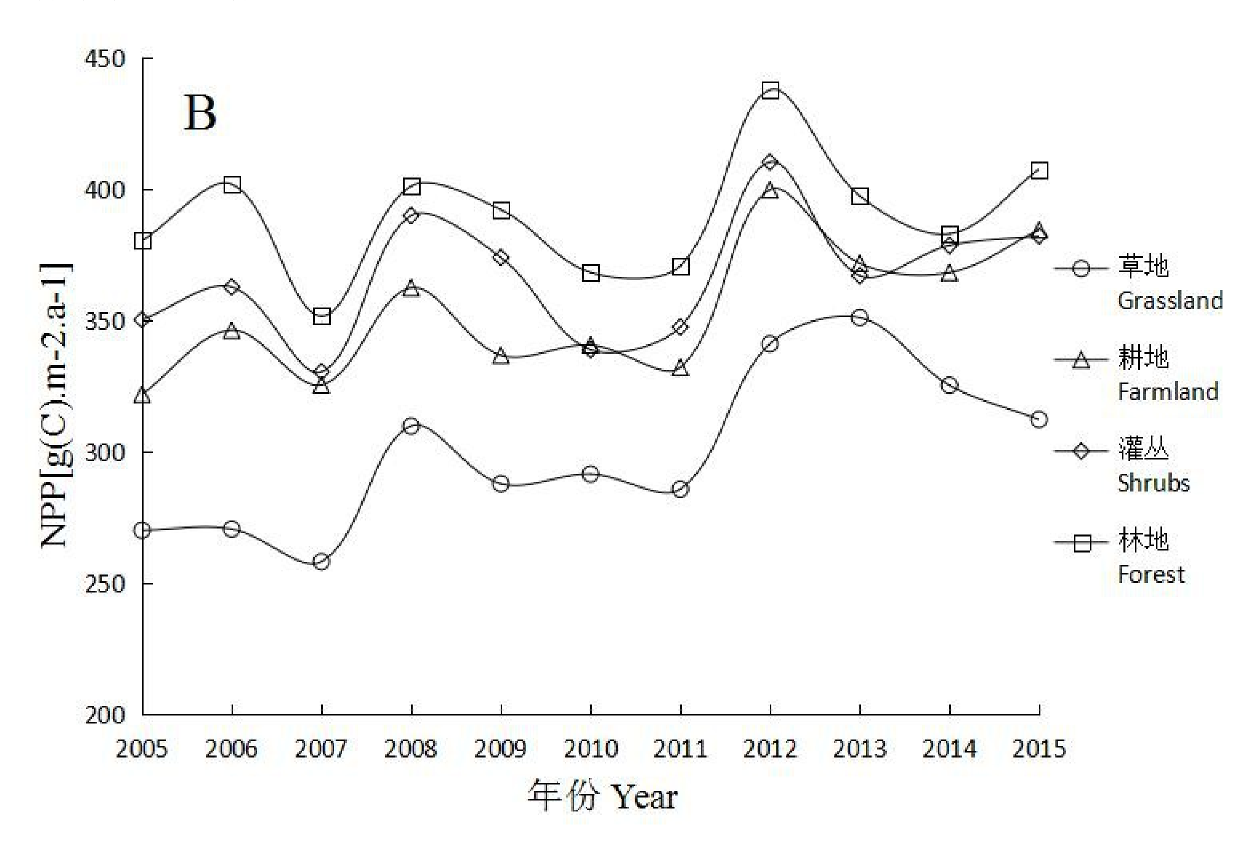
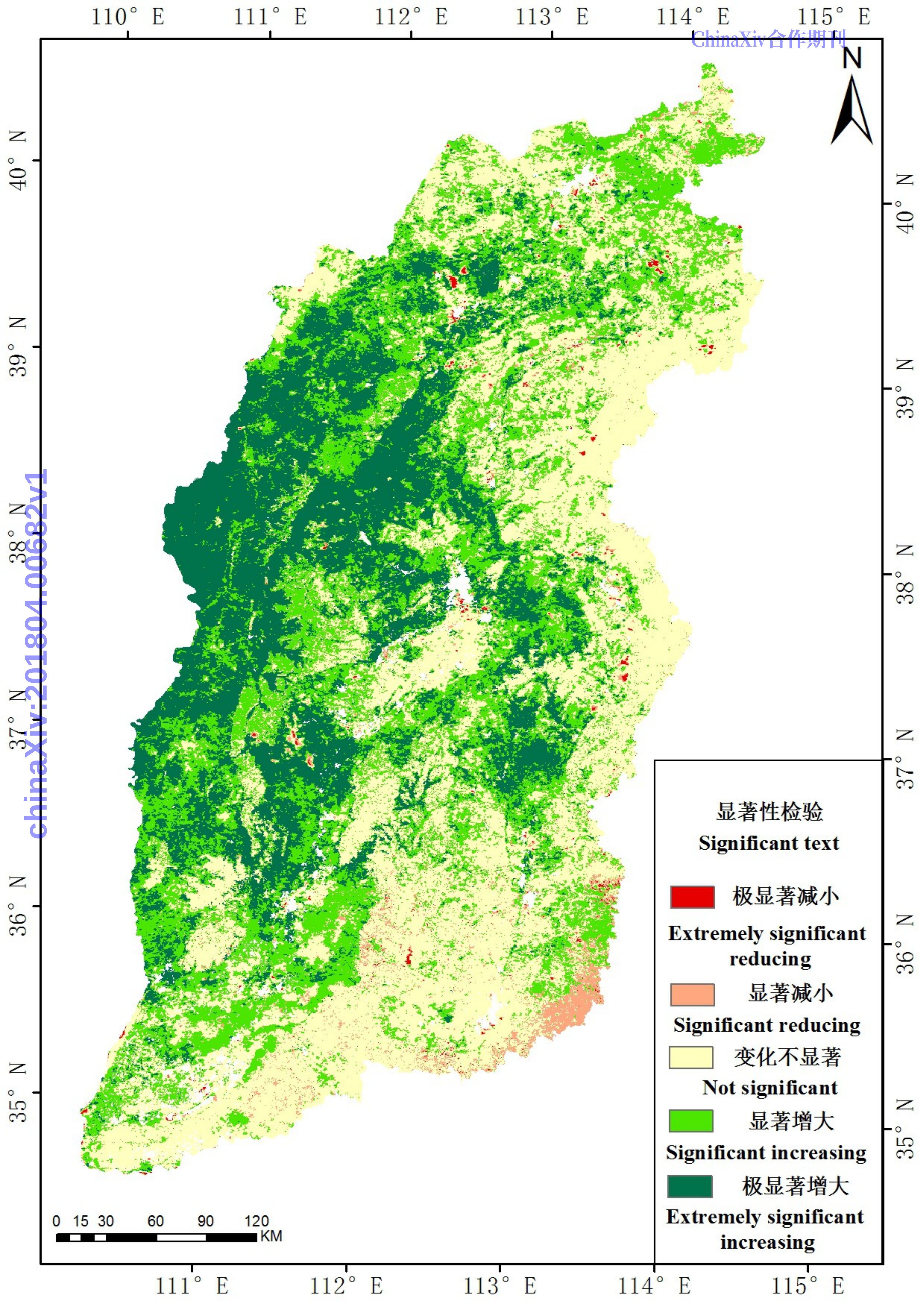


图 3 山西省 2005~2015 年植被 NPP 年平均值变化趋势图
Fig.3 Changes trend of average annual vegetation NPP of Shanxi province from 2005~2015
注：整体植被；不同类型植被
Note：all vegetation；different vegetation



110° E
111° E
112° E
113° E
114° E
115° E
N
40° N
39° N
38° N
37° N
36° N
35° N
显著性检验
Significant text
极显著减小
Extremely significant reducing
显著减小
Significant reducing
变化不显著
Not significant
显著增大
Significant increasing
极显著增大
Extremely significant increasing
0 15 30 60 90 120
KM

图 4 山西省 2005~2015 年植被 NPP 变化速率空间分布图　　图 5 植被 NPP 变化显著性检验结果图

Fig.4 Spatial distribution of annual change rate of vegetation NPP of Shanxi Province from 2005~2015　Fig.5 Vegetation NPP change significant test result

表 1 山西省 2005~2015 不同类型植被 NPP 变化显著性检验结果统计表

Table 1 Area percentages of the result of significant test of NPP changes of different vegetation types of Shanxi province from 2005~2015

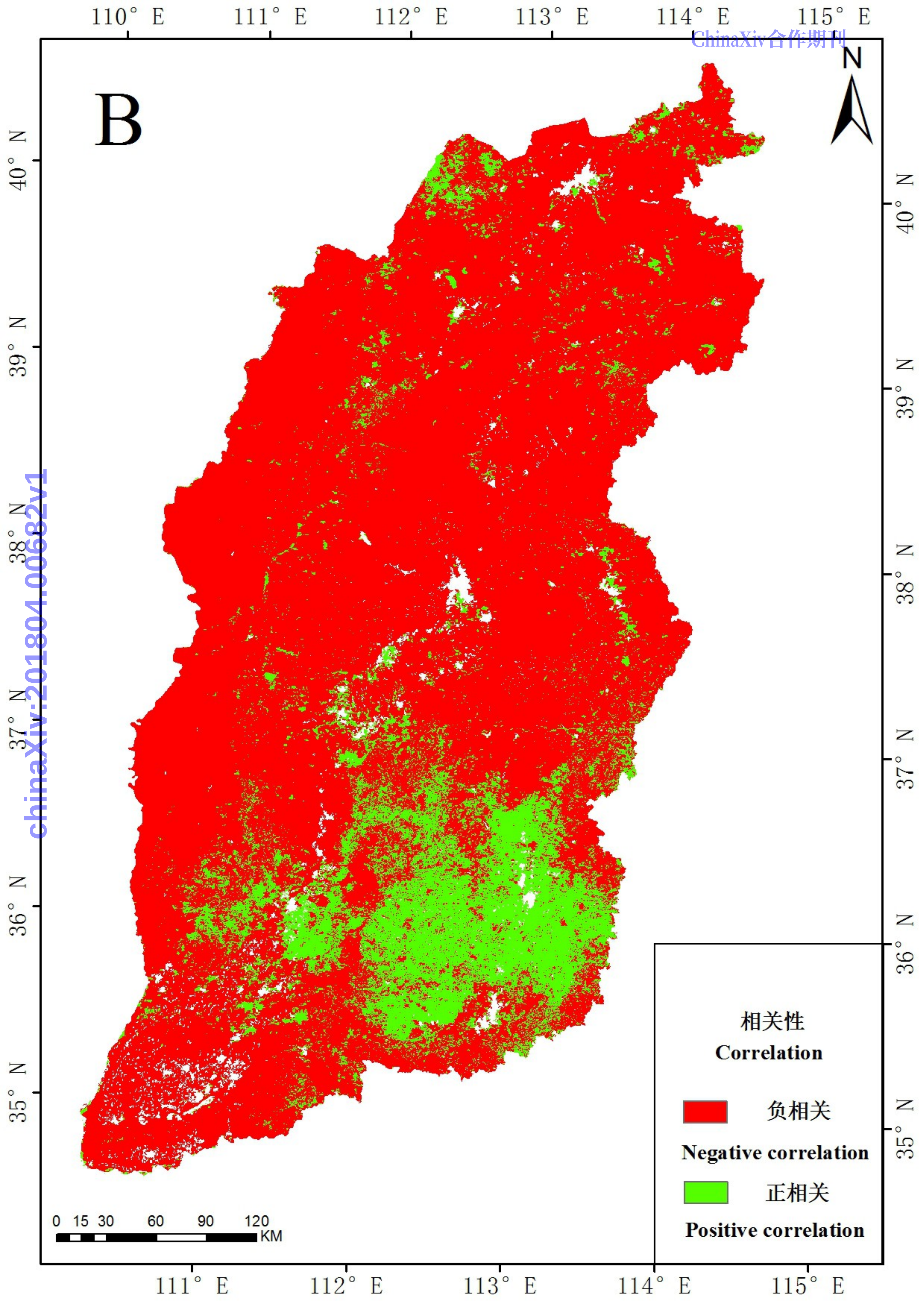
植被类型 Vegetation type	极显著减小 Extremely Significantly reducing	显著减小 Significantly reducing	不显著 Not significant	显著增大 Significantly increasing	极显著增大 Extremely Significantly increasing
草地 Grassland	0.29%	0.85%	29.66%	33.61%	35.59%
耕地 Farmland	0.19%	1.09%	45.02%	35.13%	18.57%
灌丛 Shrubs	1.22%	5.10%	60.96%	17.92%	14.80%
林地 Forest	0.17%	7.39%	69.12%	21.20%	2.11%
全部植 All vegetation	0.27%	1.95%	41.44%	31.97%	24.36%

3.3 植被 NPP 和气候因素之间相关性分析

基于研究区域平均值进行计算可知：2005~2015 年，山西省降水与植被 NPP 之间表现为显著正相关关系（P<0.05），相关性系数为 0.366；气温与植被 NPP 相关性不显著，相关系数为-0.223。结合简单相关系数分布图（图 6）和偏相关系数显著性检验结果图（图 7）能够看出：降水与植被 NPP 之间多为体现为正相关性，其中 17.01%的区域表现为显著或者极显著正相关，集中在山西省北部；气温与植被 NPP 之间多体现为负相关性，其中 3.66%的区域表现为显著或者极显著负相关，集中在山西省中部；

基于不同类型植被 NPP 与气候因素之间偏相关性系数显著性检验结果图（图 8），结合植被生态特征分析可知；不同类型植被 NPP 与降水、气温之间偏相关性的显著性检验结果和山西省整体检验结果大致相同，其中草地生态系统结构简单多变，对降水、温度，尤其对降水的变化响应最为显著，林地生态系统结构稳定，对降水、温度的变化响应最不明显。结合植被 NPP 变化研究结果能够看出，部分植被 NPP 变化显著区域，其植被 NPP 与降水、气温之间多表现显著相关，表明气候因素是造成植被 NPP 显著变化的因素之一。

上述研究发现，降水多数促进植被 NPP 增大，而气温多数抑制植被 NPP 增大，这正是干旱胁迫现象的体现，表明干旱是抑制山西省植被 NPP 增加的重要因素之一（史海萍，2006）。但是气温和降水仅在整体水平上显著影响植被 NPP 变化，通过逐象元研究分析可以发现，其对植被 NPP 显著影响的区域面积比例很低，表明气温和降水仅是影响山西省植被 NPP 变化的多种因素中的两种因素。



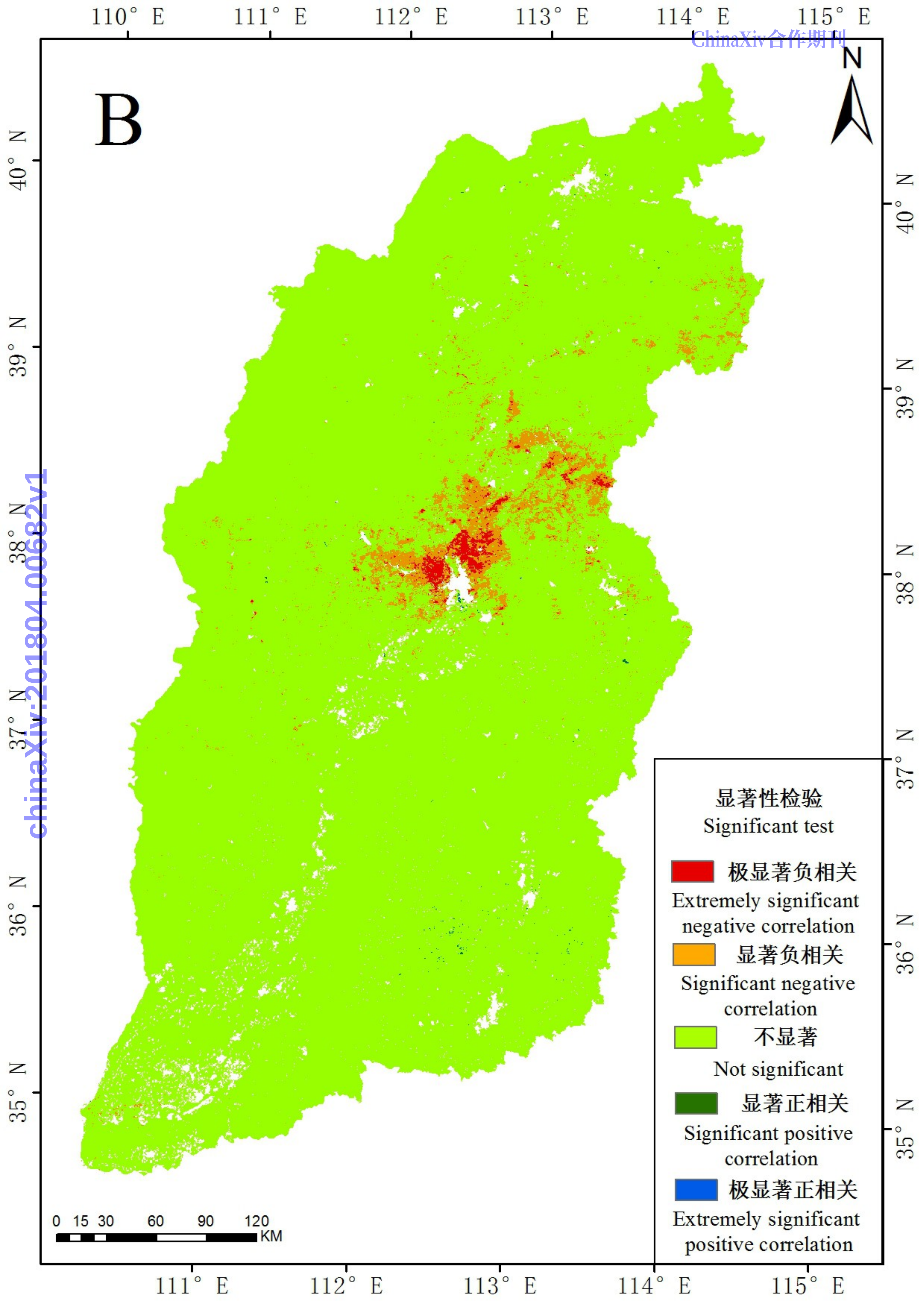
B
N
110° E
111° E
112° E
113° E
114° E
115° E
40° N
39° N
38° N
37° N
36° N
35° N
相关性
Correlation
负相关
Negative correlation
正相关
Positive correlation
0 15 30 60 90 120
KM

图 6 植被 NPP 与气象因素之间的简单相关系数分布图

Fig.6 Simple correlation coefficient between vegetation and climate factors

注：降水；气温

Note：precipitation；temperature



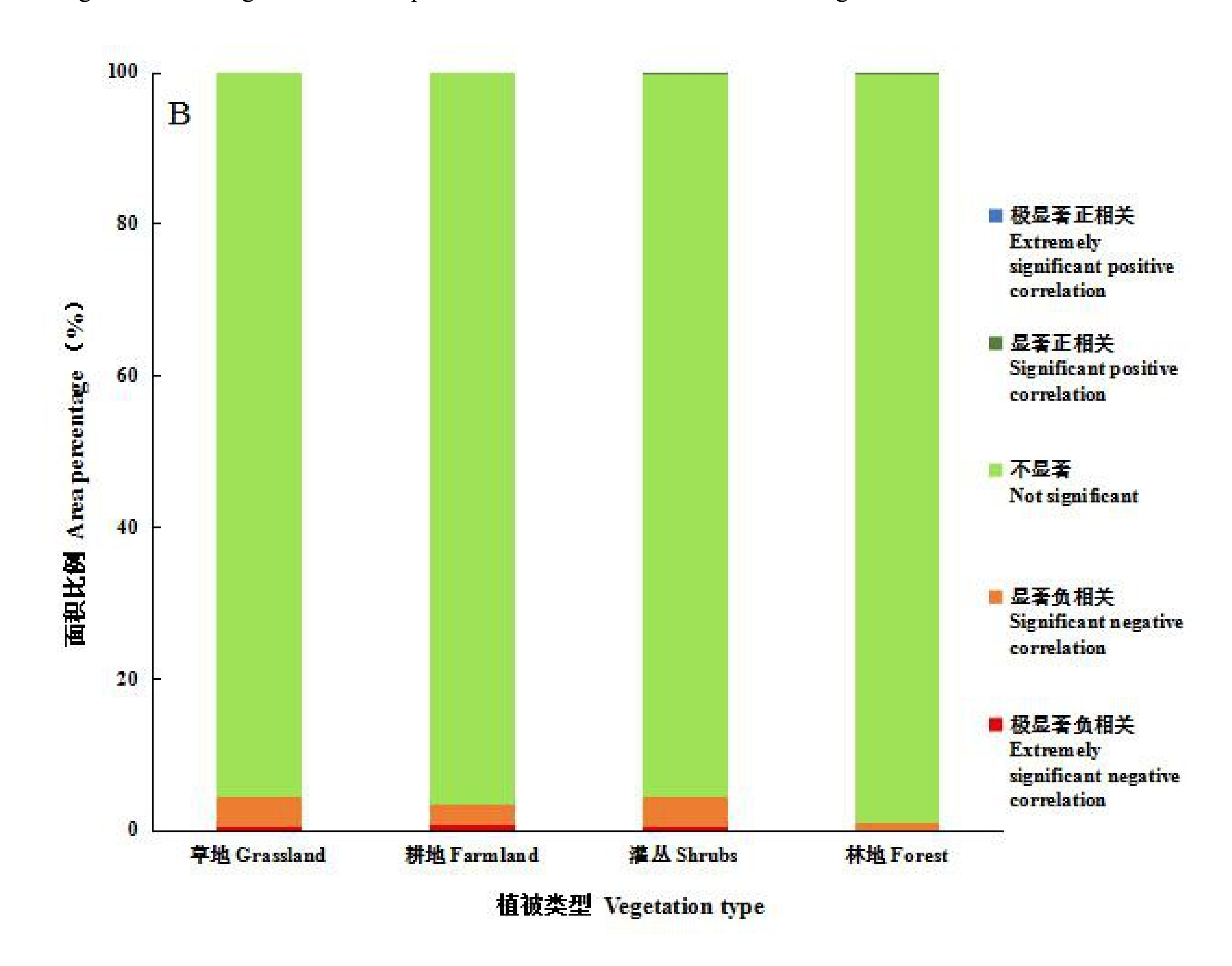
B
N
110° E
111° E
112° E
113° E
114° E
115° E
40° N
39° N
38° N
37° N
36° N
35° N
显著性检验
Significant test
极显著负相关
Extremely significant negative correlation
显著负相关
Significant negative correlation
不显著
Not significant
显著正相关
Significant positive correlation
极显著正相关
Extremely significant positive correlation
0 15 30 60 90 120
KM

注：降水；气温

Note：precipitation；temperature

图 7 植被 NPP 与气候因素之间偏相关性系数显著性检验结果图

Fig.7 Result of significant test of partial correlation coefficient between vegetation NPP and climate factors



注：降水；气温

Note：precipitation；temperature

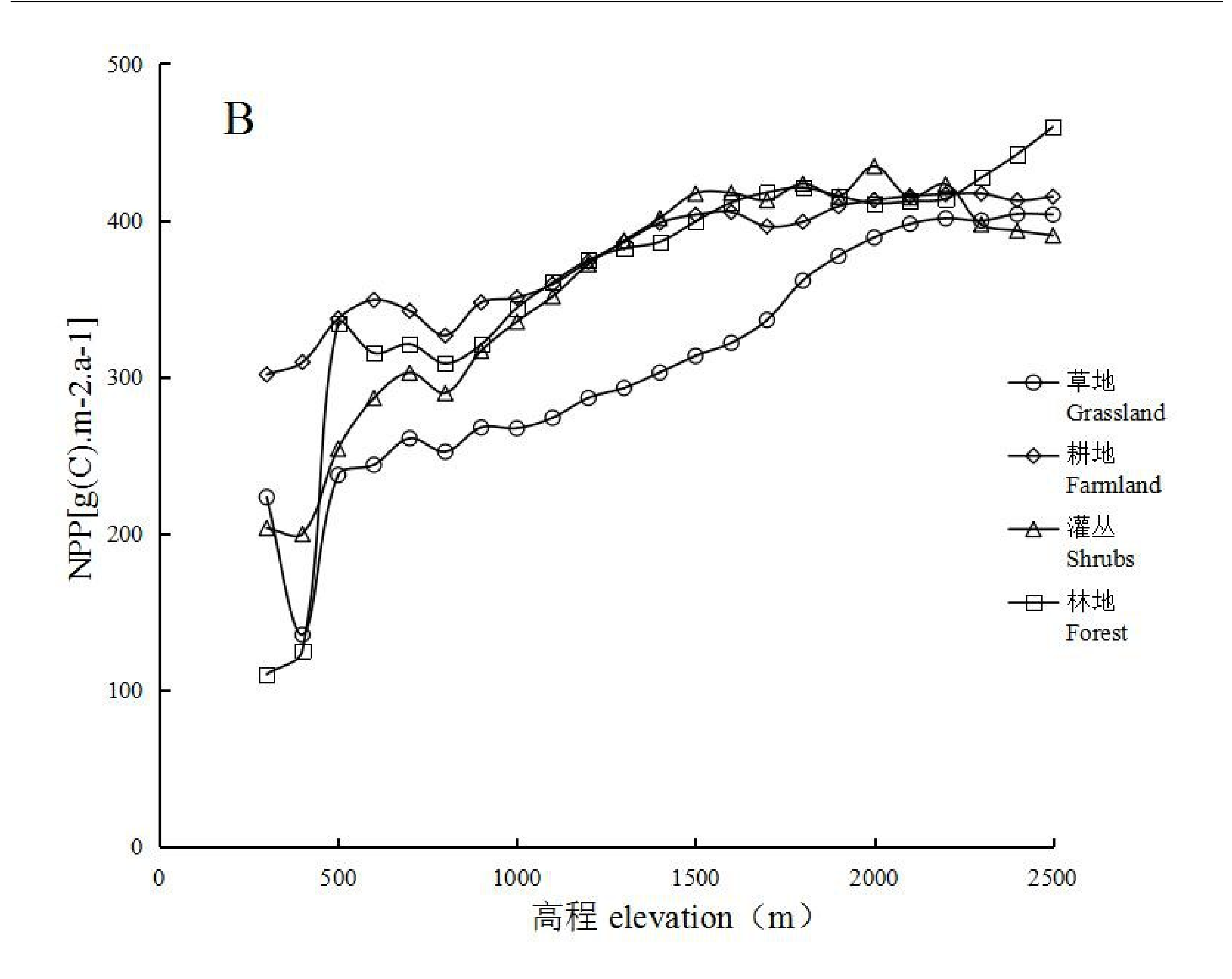
图 8 不同类型植被 NPP 与气候因素之间偏相关性系数显著性检验结果图

Fig.8 Result of significant test of partial correlation coefficient between different vegetation NPP and climate factors

3.4 高程梯度上植被 NPP 变化特征

山西省境内山脉连绵起伏、沟壑纵横交错，全区高程梯度大，不同高程地区的环境及植被类型差异显著，因此，研究高程对植被 NPP 变化的影响意义重大。

基于高程梯度对山西省 2005~2015 年植被 NPP 数据进行分区统计。根据植被 NPP 年均值、不同类型植被 NPP 年均值随高程变化图（图 9）可以看出，随着高程增加，年均植被 NPP 呈现波动上升，不同类型植被 NPP 随高程变化趋势和研究区域总体趋势大致相同，在高程介于 700~800 m 之间区域，研究区域整体植被 NPP 以及不同类型植被 NPP 都有一个明显减小的趋势，结土地利用类型数据分析，山西省中部城镇地区集中在高程 700~800 m 处，人类生产活动强烈，抑制了植被改善。



注：整体植被；不同类型植被

Note：all vegetation；different vegetation

图 9 植被 NPP 随高程变化图

Fig.9 Vegetation NPP changes with elevation

4 结论与讨论

4.1 结论

该文利用山西省 2005~2015 年 MDO17A3H 数据，结合气候、土地利用类型以及高程等数据，运用统计学分析方法，探究了 2005-2015 年山西省植被 NPP 时空分布特征及变化规律，揭示了植被 NPP 对气候、人为以及地形影响因素的响应特征，结论如下：

（1）山西省植被 NPP2005~2015 年间平均值为 326.5 g(C)·m^{-2}·a^{-1}，其中 93.53%的区域植被 NPP 值在 200~500 g(C)·m^{-2}·a^{-1}之间，草地、耕地、灌丛和林地的 NPP 平均值分别为 300.3 g(C)·m^{-2}·a^{-1}，耕地 NPP 平均值为 353.6 g(C)·m^{-2}·a^{-1}，灌丛 NPP 平均值为 366.5 g(C)·m^{-2}·a^{-1}，林地 NPP 平均值为 390.1 g(C)·m^{-2}·a^{-1}。

（2）2005~2015 年，山西省植被 NPP 整体波动增大、变化显著，显著增大及极显著增大区域面积比例达到 56.33%，主要集中在山西省西部；植被 NPP 显著减小以及极显著减小区域主要分布于山西省东南角，占比只有 2.22%。不同类型植被 NPP 的年际变化趋势与研究区域植被 NPP 总体变化趋势大致相同。

（3）草地 NPP 变化速率最大，耕地大于灌丛，而林地 NPP 变化速率最小。林地生态结构稳定，NPP 变化稳定；草地生态系统结构简单，适应能力较强，对环境变化响应更迅速，NPP 变化明显。

（3）山西省植被 NPP 与气温因素在整体水平上相关性不显著，在象元水平上表现为负相关性，其中 3.66%的区域表现为显著或者极显著负相关，主要集中在山西省中部；山西省植被 NPP 与降水因素在整体水

平上表现为显著正相关,在象元水平上表现为正相关性，其中17.01%的区域表现为显著或者极显著正相关，主要集中在山西省北部。

（4）研究期间，气候因素整体上促进了山西省植被NPP上升，而人为因素主要抑制植被NPP上升。

4.2 讨论

该文研究发现，山西省植被NPP的空间分布变化主要取决于空间位置、地形地貌、开发程度和人为管理等因素，这些因素通过控制水热、土壤等因子影响着植被NPP的空间分布以及变化特征，其中干旱是抑制植被NPP增加的重要因素之一。受温带大陆季风性气候影响，山西省雨季和热季同期，但降水量远小于蒸发量，容易形成干旱胁迫现象，抑制植被NPP的增加；草地植被以及耕地植被受人类影响较强，NPP变化明显，林地多位于山区，受人类影响较小，NPP数值较为稳定。

该文研究期间，山西省植被整体上呈好转趋势，研究结果与国内许多专家学者的研究结果相同，党跃军等（2015）对山西省植被时空变化格局的研究发现山西省在2003~2012年10年间植被呈好转趋势，草地、灌丛、林地均有改善。武永利等（2008）对山西省植被指数时空变化特征的研究发现山西省近25年间植被指数波动上升，植被总体呈好转趋势。杜加强等（2015）关于新疆地区植被NDVI的研究得出植被从1982年到2012年逐渐改善；李辉霞等（2011）对三江源区域NDVI的研究得出植被从2000到2014年逐渐变好；李晓荣等（2017）对太行山植被NPP的研究中，发现植被NPP在2000~2014年间呈好转趋势；但也有研究发现，有些区域在研究期间植被并未得到改善。张莎等（2015）基于长时间多系列遥感数据对河北植被NPP的研究得出河北省大部分区域植被NPP在2000~2014年间逐渐减小。为此有专家（阿多和赵文吉等，2017）提出，不同地区植被的变化规律之间存在明显的差异性，所以，不同区域的植被在面临相同的环境改变条件下，体现出的响应特征也会表现出较明显的差异。该文目前仅对MODIS NPP数据进行了分析应用，缺少实地的考察认识，结合社会、人为、经济方面的研究还不够。对人类活动造成植被NPP变化的研究缺乏定量研究，实际的应用意义不大，这是在以后研究中需要改进完善的。MODIS数据的精度还存在一定的问题，需要综合考虑多方面的影响因素，并且结合研究区域的具体情况，这样才能在本土化研究中取得更准确的研究结果。目前，不同植被NPP模型之间在精度和准度方面存在较大差异，其研究结果缺乏可比性；有学者认为综合多种算法的集合预估方法能够有效的提高模型模拟精度，其模拟结果明显好于单一算法，这将会是成为今后关于植被NPP研究的一个重要前进方向。

参考文献

A D, ZHAO WD, GONG ZN, et al, 2017. Temporal analysis of climate change and its relationship with vegetation cover on the north China plain from 1981 to 2013[J]. Acta Ecol Sinca, 37(2): 576-592. [阿多，赵文吉，宫兆宁，等，2017. 1981-2013华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报，37(2)：576-592]

ANAYETI A, SHI QD, LIU M, et al, 2014. The vegetation cover changes of regress analysis on using time-serial images of remote sensing[J]. J Xinjiang Univ: Nat Sci Ed, 34(3): 341-344. [阿斯姆古丽·阿纳耶提，师庆东，刘曼，等，2014. 长时间序列遥感数据回归分析支持下的植被变化分析[J]. 新疆大学学报：自然科学版，31(3)：341-344]

CHEN LJ, LIU GH, LI HG, 2002. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation in China using remote sensing[J]. J Remote Sens, 6(2): 129-135. [陈利军，刘高焕，励惠国，2002. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J]. 遥感学报，6(2)：129-135]

DU JQ, AHATI J, ZHAO CX, et al, 2015. Dynamic changes in vegetation NDVI from 1982 to 2012 and its response to climate change and human activities in Xinjiang, China[J]. Chin J Appl Ecol, 26(12): 3567-3578. [杜加强，贾尔恒·阿哈提，赵晨曦，等，2015. 1982-2012年新疆植被NDVI的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 应用生态学报，26(12)：3567-3578]

DANG YJ, WANG LX, YAN JX, 2015. Spatiotemporal Dynamic of Vegetation and Its Response to Climatic Factors in Shanxi Province from 2003 to 2012[J]. Res Soil Water Conserv, 22(2): 235-240. [党跃军，王礼霄，严俊霞，2015. 山西省2003-2012年植被时空变化格局及对气候因子的响应[J]. 水土保持研究，22(2)：235-240]

LIETH H, WHITTAKER RH, 1975. Primary Productivity of the Biosphere[M]. BERLIN HEIDELBERG: SPRINGER-VERLAG

LI HX, LIU GH, FU BJ, 2011. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River

Headwaters region[J]. Acta Ecol Sin, 31(19): 5495-5504. [李辉霞，刘国华，傅伯杰，2011. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报，31(19)：5495-5504]

LI XR, GAO H, HAN LP, et al, 2017. Spatio-temporal variations NPP and the driving factors in Taihang Mountain Area[J]. Chin J Eco-Agric, 25(4): 498-508. [李晓荣，高会，韩立朴，等，2017. 太行山植被NPP时空变化特征以及驱动力分析[J]. 中国生态农业学报，25(4)：498-508]

MU SJ, LI JL, ZHOU W, et al, 2013. Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010[J]. Acta Ecol Sinca, 33(12):3752-3764. [穆少杰，李建龙，周伟，等，2013. 2001-2010年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报，33(12)：3752–3764]

PIAO SL, FANG JY, GUO QY, 2001. Application of CASA model to the estimation on of Chinese terrestrial net primary productivity[J]. Chin J Plant Ecol, 25(5): 603-608. [朴世龙，方精云，郭庆华，2001. 利用CASA模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报，25(5)：603–608]

SHI HP, 2006. Research of the climate of Shanxi province and the impact on the vegetation ecosystems[D]. Lanzhou: Lanzhou university: 34-56. [史海萍，2006. 山西气候变化及植被生态系统的响应研究[D]. 兰州：兰州大学：34-56]

SUN LW, 2013. Temporal and spatial variation of vegetable net primary productivity and influence of climate change and human activity in Qilian mountains[D]. Lanzhou: Northwest normal university. [孙力炜，2013. 祁连山区植被净第一性生产力的时空分布特征及气候变化和人类活动的影响[D]. 兰州：西北师范大学]

SUN R, ZHU QJ, 2001. Effect of climate of terrestrial net primary productivity in China[J]. J Remote Sens, 5(1): 58-61. [孙睿，朱启疆，2001. 气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究[J]. 遥感学报，5(1)：58–61]

WU SS, YAO ZJ, JIANG LG, et al, 2016. The spatial-temporal variations and hydrological effects of vegetation NPP based on MODIS in the source of the Yangtze River[J]. J Nat Resour, 31(1): 39-51. [吴珊珊，姚治君，姜丽光，等，2016. 基于MODIS的长江源植被NPP时空变化特征及其水文效应[J]. 自然资源学报，31(1)：39-51]

WU YL, LUAN Q, ZHAO YQ, et al, 2008. Analyses on spatial-temporal change characteristics of NDVI during the past 25 years in Shanxi[J]. Ecol Environ, 17(6): 2330-2335. [武永利，栾青，赵永强，等，2008. 近25年山西植被指数时空变化特征分析[J]. 生态环境，17(6)：2330-2335]

YUAN W, CAI WW, LIU D, et al, 2014. Satellite-based vegetation production models of terrestrial ecosystem: An overview[J]. Advan Earth Sci, 29(5): 541-550. [袁文平，蔡文文，刘丹，等，2014. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展[J]. 地球科学进展，29(5)：541-550]

ZHANG S, 2015. Research on spatio-temporal distribution of vegetation net primary productivity in Hebei Province based on longtime-series multi-source remote sensing data[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University. [张莎，2015. 基于长时间序列多源遥感数据的河北省植被 NPP时空分布研究[D]. 石家庄：河北师范大学]

ZHU F, LIU ZM, WANG ZM, et al, 2010. Temporal-spatial characteristic and factors influencing crop NPP across northeastern China[J]. Resour Sci, 32(11): 2079-2084. [朱锋，刘志明，王宗明，等，2010. 东北地区农田净初级生产力时空特征及其影响因素分析[J]. 资源科学，32(11)：2079-2084]

ZHU WQ, PAN YZ, ZHANG JS, 2007. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Chin J Plant Ecol, 31(3): 413-424. [朱文泉，潘耀忠，张锦水，2007. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报，31(3)：413-424]